

# Material Properties Estimation of Fingertips based on MR Images and Iterative FE Analysis

○多田 充徳(産総研) 永井 教崇(慶應大) 吉田 宏昭(産総研) 前野 隆司(慶應大)

Mitsunori Tada<sup>1,2</sup> Noritaka Nagai<sup>3</sup> Hiroaki Yoshida<sup>1,2</sup> Takashi Maeno<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Digital Human Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

<sup>2</sup> CREST, Japan Science and Technology Agency

<sup>3</sup> School of Integrated Design Engineering, Graduate School of Science and Technology, Keio University

<sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, Keio University

*Key Words* : Soft tissue, Nonlinear material property, Large deformation, FEM, MRI

## 1 はじめに

有限要素モデルに設定する材料定数次第で、解析の再現精度が大きく変化する。特に生体軟組織を対象とした解析を行う場合、大変形に伴う材料・幾何学的非線形性、材料特性が異なる皮下部位、更には個人差を考慮した材料定数を設定することが望ましい。

生体軟組織に対する非侵襲剛性分布推定法としては、MRE<sup>1)</sup>や準静的MREが有望な方法とされている。これらは、病巣部の特定のような診断補助システムとしての使用を前提として開発されている。このため、大変形を考慮した材料定数推定を行うことができないという問題を有する。

一方、我々が提案するのは、軟組織の有限要素解析を高い精度で行うことを主眼に置いた、大変形、皮下部位、個人差を考慮できる材料定数推定法である。本稿では、提案手法の概要と、3層シリコンゴム試料を用いた推定精度の検証結果について概説する。また、指先の材料定数推定に向けた今後の展開について述べる。

## 2 提案手法

**2.1 手法の概要** Fig.1に3層シリコンゴムを例に提案手法の流れを示す。以下に、図中の番号を用いてその概要を説明する。

**MR圧縮試験** 皮下部位の変形を可視化するために、MRI内で生体圧縮試験を行う。また、圧縮に伴う反力をMR対応力センサ<sup>2)</sup>を用いて計測する。

**FEモデル生成** 圧縮前のMR画像から皮下部位を有する有限要素モデルを生成する(図中①)。このモデルに対し、MR圧縮試験と同じ変位・力境界条件(図中②)を設定する。

**反復FE解析** 各部位の材料定数として、適当な初期値を設定する(図中③)。そして、有限要素法で計算した変位場を用いて計算機上で仮想的に変形させたMR画像(図中④、以下FE変形画像と呼ぶ)と、MRIで撮像した変形時の画像(以下MR変形画像と呼ぶ)との類似度が最大になるように材料定数を最適化し、最終的な値を推定値とする(図中⑤)。

この手法には、既存の材料定数推定法と比べて明確な利点がある。第1に、表面のみならず皮下部位に関しても大変形を考慮した材料定数推定が行うことができる点である。MRIを用いることで皮下部位の非侵襲計測が可能となり、FEMを用いることで大変形にも対応した複雑な力学モデルの導入が可能となるからである。

第2に、推定値を用いた有限要素解析の変形再現性が自ずと高くなる点である。FE変形画像とMR変形画像との誤

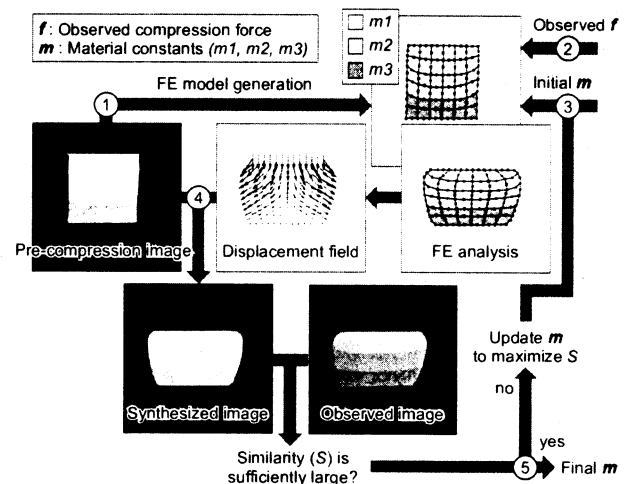


Fig. 1: Proposed method for material properties estimation

差が最小になるような材料定数を推定しているため、この点については自明であろう。

最後に、FE変形画像とMR変形画像とを比較することで、有限要素解析結果の変形再現誤差を可視化し、その定量的な評価を行うことができる点である。組織全体の変形を計算しているにも関わらず、結局はインデンタの押し込み量と反力との関係のような局所的评价が行われることが多かった有限要素解析であるが、この方法を用いれば大局的评价を行うことができる。

**2.2 手法の実装** 本研究では、MR画像の輝度変化に対しても頑健な材料定数推定が行えるよう、NMI(Normalized Mutual Information)<sup>3)</sup>を用いた画像比較を行う。即ち、2.1の反復FE解析の最適化とは、FE変形画像とMR変形画像との間のNMI最大化問題へと帰着される。

NMIの最大化には数値的最適化を用いる。様々なアルゴリズムが提案されているが、本研究では、ダウンヒル・シンプレックス法を選択する。数値的最適化の多くが勾配の計算を必要とするのに対し、この手法は勾配を使用しない直接探索法に分類される。このため、勾配の解析的・数値的計算が難しい問題には適当であると考えられる。

本研究では、この反復FE解析を、汎用非線形有限要素解析プログラムABAQUSとプログラミング言語MATLABを用いて実装した。即ちABAQUSで有限要素解析を行い、MATLABでFE変形画像の生成、NMIの計算、ダウンヒル・シンプレックス法を用いた材料定数の最適化を行う。

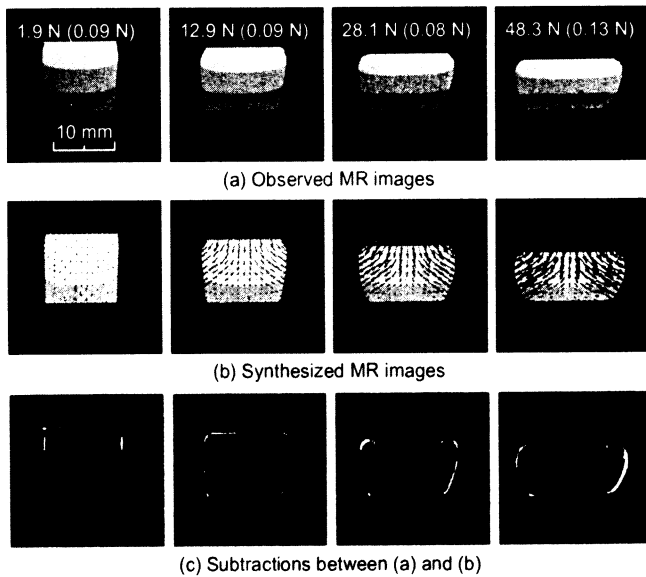


Fig. 2: Material properties estimation of a 3-layered silicone rubber sample

### 3 結果

**3.1 3層シリコンゴム試料** 3層シリコンゴム試料の材料定数推定について述べる。試料の圧縮には、手動リニアステージと独自に開発した光学式力センサ<sup>2)</sup>を用いた。いずれも非磁性部材で作られているため、極めて高いMR適合性を有する。撮像には磁場強度4.7 Tの実験用MRI (Unity INOVA, Varian)を用いた。層の違いを明確に可視化できるようにスピンエコーシーケンスを選択し、TRを500 msec、TEを19 msec、FOVを25×25 mm、解像度を256×256と設定した。また、スライス厚を2.0 mm、加算回数を4回とした。以上の設定で、撮像には約12分を要する。MR画像の撮像中には約10 sec周期で力の計測を行い、その平均値を圧縮力とした。

Fig.2-(a)に撮像した圧縮過程の試料断面を示す。図中の数字が平均圧縮力と標準偏差を表している。強磁場環境内にも関わらず、安定した力計測が実現されていることが分かる。Fig.2-(a)左の無圧縮時の断面画像から平面歪みを仮定した8節点4辺形要素で構成された有限要素モデルを生成し、提案手法を用いた材料定数推定を行った。なお、シリコンゴムの材料としては $\alpha$ を1.4に固定した1次Ogdenモデルを用いた。つまり、各層の材料定数は $\mu$ のみであり、3層構造を有するため3変数の最適化問題となる。

Fig.2-(b)に有限要素法で計算した変位場と、それに基づき生成したFE変形画像を示す。最適化の最終反復時に生成された画像であるため、変形状態はFig.2-(a)とほぼ一致する。この3層シリコンゴム試料については、各層の材料定数を誤差7%以下で推定することが出来た。

FE変形画像とMR変形画像を用いて、有限要素解析結果の検証を行うこともできる。Fig.2-(c)に、それらの差の絶対値を示す。単純な差画像であるため、輝度の大小がそのまま解析誤差の大小を表す訳ではない。しかし、層の境界や試料の輪郭上では、変位の再現精度を見積もることができる。例えば、差の大きい試料右側の誤差は約1mmに相当するため、有限要素解析の最大変形誤差は約8%となる。

**3.2 指先** 指先の材料定数推定のために計測したMRボリュームと、生成したFEモデルについて述べる。指先の

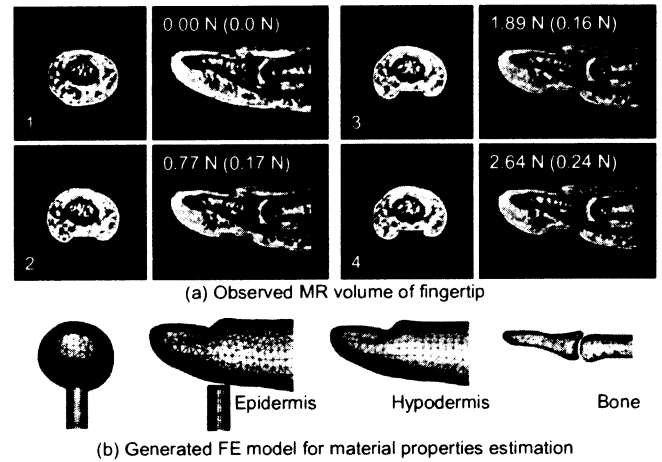


Fig. 3: Observed MR volume data and generated FE model of fingertip

撮像にもシリコンゴム試料の撮像と同じMRIを使用した。撮像を短時間に行うために3次元グラデーディエントエコーシーケンスを選択し、TRを20 msec、TEを10 msec、FOVを120×30×30 mm、解像度を512×128×128と設定した。以上の設定で、撮像には約5分を要する。

Fig.3-(a)に、示指軸方向面・矢状面スライス画像を示す。直径5 mmの円柱インデンタで圧縮されているため、いずれの画像においても指先中央付近が変形する。圧縮力はMR対応力センサで計測した。計測中に指先が揺動するため、3.1のシリコンゴム試料に比べて、単位圧縮力当たりの標準偏差が20倍以上大きくなるのが分かる。Fig.3-(b)に、生成した有限要素モデルを示す。骨・皮下組織・表皮の3部位から構成されており、いずれも4面体2次要素を用いた分割を行った。3部位の総要素数は10713である。

以上の計測データと作成した有限要素モデルを用いて、皮下組織と表皮の材料定数推定を行う予定である。表皮の厚さは0.5 mm程度であるため、MR画像中ではたかだか2から3ピクセル程度の厚みしかない。つまり、直接的な変形の計測は難しい。しかし本稿で提案した手法では、組織全体の変形情報を用いて材料定数を推定することができる。例えば、被圧縮部以外の指先表面形状にも、皮下組織と表皮の剛性情報は暗に含まれているはずである。このため、材料定数の推定が問題なく行えるものと考えている。

### 4 結論

有限要素解析を高い精度で行うことを主眼においた、生体軟組織の材料定数推定法を提案した。本手法には、軟組織の大変形解析、そしてその定量的評価を行うために必要な機能が備わっている。3層シリコンゴム試料を対象とした検証を行い、この手法が有効であることを示した。今後はこの手法を実際の指先へと適用する。

### 参考文献

- 1) R. Muthupillai, D. J. Lomas, P. J. Rossman, J. F. Greenleaf, A. Manduca, R. L. Ehman. "Magnetic Resonance Elastography by Direct Visualization of Propagation Acoustic Strain Waves". Science. vol. 269, pp. 1854-1857, 1995.
- 2) M. Tada, T. Kanade. "Design of an MR-Compatible Three Axis Force Sensor". in Proceeding of the International Conference on Intelligent Robots and Systems. pp. 2618-2623, 2005.
- 3) C. Studholme, D. Hill, D. Hawkes. "An Overlap Invariant Entropy Measure of 3D Medical Image Alignment". Pattern Recognition. vol. 32, no. 1, pp. 71-86, 1999.